

引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析

于波^{1, 2} 林永辉¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 北京市气象台, 北京 100089

摘 要 利用 NCEP 格点再分析资料、观测资料和 MM5 模式的高分辨率输出资料, 对 2004 年 9 月 4~6 日发生在四川盆地东部地区的大暴雨过程进行了诊断分析和数值模拟, 重点分析引发这次大暴雨的西南低涡的结构和演变特征及其在暴雨发生发展过程中的作用。对低层 850 hPa、700 hPa 候平均水汽通量和各时刻整层水汽通量的分析表明, 此次西南低涡暴雨的水汽主要来自于南海, 水汽沿西太平洋副热带高压的西南侧经青藏高原东部流入四川盆地。在西南低涡的发展过程中, “桑达” 台风向西北移动, 阻断了西太平洋副热带高压的东退并切断副高, 被切断的高压部分滞留在西南低涡东侧, 导致低涡不能顺利东移。数值模拟研究发现, 在西南低涡的发展过程中, 中层 400~500 hPa 附近一直伴有涡旋的存在, 且此涡旋的发展演变过程与低层涡旋明显不同; 中层涡旋的发展不像低层涡旋那样呈现单边持续地增长或衰减的特征, 而是呈现明显的增长-衰减-再增长的演变特征, 其最大值增长时段和低层涡旋也并不一致。分析表明这个中层涡旋实际上是中层大气里一个中尺度闭合低压造成的, 这个闭合低压是由高空槽加深发展而来的。数值模拟输出结果还显示, 发生在西南低涡东侧切变线里的对流垂直运动是由高空槽里的闭合低压激发出来的。

关键词 西南低涡 切变线 对流 暴雨

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0141-14

中图分类号 P448

文献标识码 A

A Case Study of Southwest Vortex Causing Heavy Rainfall in Eastern Sichuan Basin

YU Bo^{1, 2} and LIN Yong-Hui¹

1 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

2 *Beijing Municipal Meteorological Observatory, Beijing 100089*

Abstract Using NCEP data of $1^\circ \times 1^\circ$ with 6-hour interval, observation and MM5 model output data, the evolution of Southwest Vortex (SW) causing heavy rainfall in eastern Sichuan basin during 4-6 September 2004 is investigated. The diagnostic analyses indicate that the vapor of low level mainly came from the South China Sea, the vapor moisture reached Sichuan Basin by passing through the southwest of the western Pacific subtropical high (WPSH). During the development of SW, the typhoon named Sangda moved toward China mainland and finally cut off WPSH. The destroyed part of WPSH remained on mainland and prevented eastward movement of SW. The numerical simulations reproduce fully the evolution characteristics of SW from monotone increasing to monotone decreasing. The simulation also shows a vortex which had been existing in the middle level during the development of SW. Its center was located on the south of SW, and the evolution of the vortex was different from SW. The middle-level vortex evolution presented the characteristics from increasing to decreasing and again increasing, and the stage of the largest increasing was also different from SW. The analysis indicates that this middle-level vortex resulted from the

收稿日期 2006-09-25, 2006-12-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418304 和国家自然科学基金资助项目 40745026

作者简介 于波, 女, 1979 年出生, 硕士。E-mail: yubo_0@126.com

middle-level mesoscale low, and the deepening of middle-level trough caused the development of the mesoscale low. The simulation also indicates that the strong convection in the shear line located on the east part of SW was triggered by the middle-level mesoscale low.

Key words southwest vortex, shear line, convection, heavy rainfall

1 引言

2004 年 9 月 2~6 日, 四川盆地东部区域出现罕见的暴雨天气, 重庆市开县在 9 月 4 日 00:00~5 日 00:00 (国际协调时, 下同) 降雨量达 298.0 mm, 创下当地日降雨量的历史极大值。西南低涡在四川盆地东部长时间的停滞少动是造成此次暴雨天气过程的重要原因, 西南低涡于 9 月 3 日 00:00 左右生成, 9 月 4 日 00:00~6 日 00:00 西南低涡中心一直停滞在 (30°N , 106°E) 附近。这次降水过程在时间和空间分布上都具有很强的中尺度特征^[1~3]。

西南低涡是在我国青藏高原地形影响下以及在一定的环流背景形势下产生的中间尺度天气系统, 几乎整年都能被观测到, 但造成强降水或强对流天气的西南低涡几乎都出现在夏半年, 它是造成我国夏半年暴雨的重要天气系统之一^[4, 5]。不少研究^[6~11]分别从天气动力学、数值试验及诊断分析的角度对西南低涡的形成及发展机理进行了研究, 提出了很多理论和看法, 这些研究丰富和发展了对西南低涡形成及发展机理的理解和认识。

在对西南低涡的垂直结构及其演变的研究方面, 传统的西南低涡概念模式认为西南低涡在垂直方向上伸展较为浅薄, 500 hPa 和 300 hPa 上对应的常是高压区或高压脊^[4]。Kuo 等^[12]指出发展成熟的西南低涡对流层高层 200 hPa 上为负涡度; 黄福均^[13]对西南低涡暴雨过程的合成分析也表明在 200 hPa 上合成中心呈现大片负涡度分布。而陈忠明等^[14]对西南低涡的中尺度结构分析发现, 成熟期的低涡区域内正涡度从边界层一直贯穿至对流层顶的 100 hPa 以上, 西南低涡从边界层到对流层高层均表现为闭合性气旋环流, 大值轴线几乎完全处于垂直状态, 这与人们长期以来所形成的西南低涡在高层对应为反气旋和高压脊的观点不同^[4, 12, 13]。程麟生等^[15]通过对四川“81.7”暴雨的研究指出, 高、低空气旋性涡度中心在四川盆地上空的叠加和耦合是西南低涡在成熟阶段强烈发展的主要原因。陈忠明等^[16]进行了高原涡与西南低涡耦合作用的

个例诊断, 发现当 500 hPa 高原低涡东移到 100°E 附近时, 其低涡东部的正涡度平流和负的非平衡强迫与 850 hPa 西南低涡发生垂直叠加时, 两者发生耦合作用导致西南低涡和高原低涡同时发展。但由于受所用资料时空分辨率的限制, 目前对西南低涡的垂直结构及演变的研究还相当有限, 这无疑值得我们进一步去研究探讨这个问题。

对本次西南低涡暴雨过程的中尺度分析表明, 有利于对流活动发展和暴雨发生的区域并不在西南低涡的中心, 而是出现在西南低涡东侧的暖式切变线上, 并且认为低涡暖切变线南北两侧的正反向垂直环流使得切变线上深厚的上升运动发展维持^[2]。注意到西南低涡东侧的暖式切变线在低涡生成后始终是存在的, 但切变线上深厚的上升运动却不是时时都很明显, 这表明西南低涡东侧切变线上对流活动的触发机理并不是很清楚。基于前面的分析说明, 本文准备利用 NCEP 时间间隔为 6 小时、空间间隔为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的再分析格点资料、常规观测资料及非静力中尺度模式 MM5, 对 2004 年 9 月初发生在四川盆地东部的区域性大暴雨过程进行诊断分析和数值模拟。重点利用高时空分辨率的模式输出资料对西南低涡的三维结构、演变特征及所伴随暴雨的可能触发机理进行分析研究。

2 天气过程描述及水汽来源分析

2004 年 9 月初发生的这次暴雨过程强降水主要出现在 9 月 3~5 日, ($29^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 的区域内, 主要降水中心在四川省东部和重庆市西北部, 72 小时累积降雨量高达 400 mm 以上。此次大暴雨过程由三个降水时段组成, 最强降水时段发生在 4 日 23:00 至 5 日 06:00, 累计降水量达 122 mm^[2]。本文将重点研究最强降水时段的天气系统及演变, 模式积分时间从 9 月 4 日 00:00 开始到 6 日 00:00 结束。

此次暴雨过程是在稳定的大尺度环流形势下发生的。9 月 2 日, 500 hPa 高纬地区为明显的两槽一脊, 乌拉尔山地区和东亚沿岸地区为低压槽区, 贝

加尔湖地区为平浅高压脊；中纬地区在青藏高原东部存在一个逐渐加深发展的低槽，西太平洋副热带高压势力强大，控制着我国长江以南地区。9月2日12:00，随着乌拉尔山低槽向南加深，中纬度经向环流加大，使得不断南下的冷空气与副高西北部的暖湿气流在高原东北部汇合，在高原上形成切变线，该切变线东移到四川盆地上空是导致前期强降水的主要原因^[2, 3]。

随着500 hPa高空槽的加深发展，3日00:00在700 hPa上(29°N~30°N, 103°E~104°E)附近区域出现了闭合的小低压(图1a)，西南低涡初步生成，西南低涡在4日00:00较之初生时已经加深发展(图1b)。在3日00:00西南低涡东侧为强大的西太平洋副热带高压，代表副高势力的5880 gpm线一直延伸到了100°E以西(图2a)。图1和

图2显示，生成于西太平洋的2004年19号台风“桑达”不断向西北方向移动，在台风的移动过程中，西太平洋副热带高压逐渐减弱并最终被台风切断(图2b)。被台风切断的副热带高压在一定程度上阻碍了西南低涡的向东移动，致使低涡长时间停留在106°E附近。可以说，“桑达”台风与西太平洋副热带高压共同作用在某种程度上形成了对大气环流场的阻塞。在此期间，青藏高原东部的低槽不断发展，至4日00:00在500 hPa高度场上(30°N, 105°E)附近已经加深为闭合低压(图2b)，此时西南低涡处于高空槽前。

NCEP再分析资料的850 hPa、700 hPa候平均(9月1日00:00~6日00:00)水平水汽通量(图3a、b)分布显示，低层的水汽输送主要来自南海，这股水汽沿西太平洋副热带高压的西南侧经青藏高

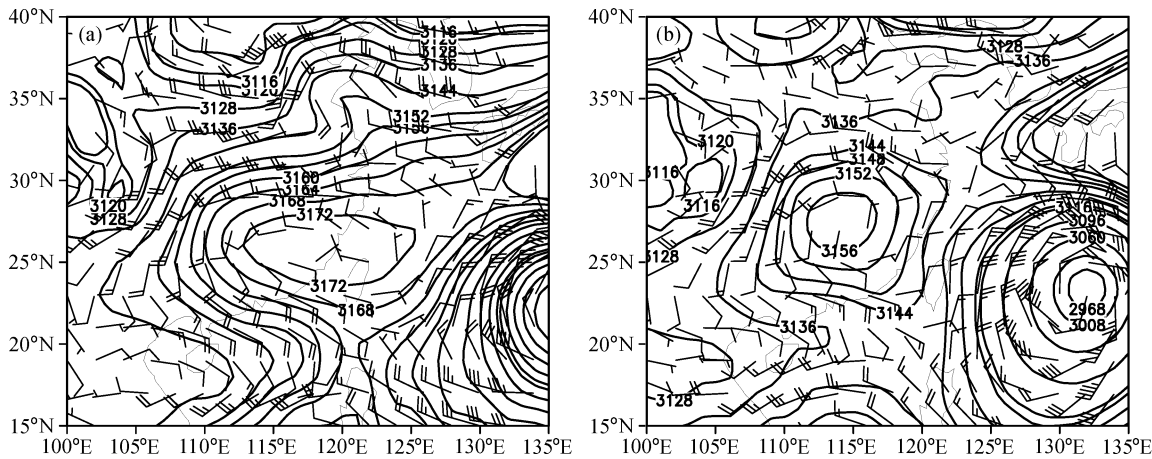


图1 NCEP资料700 hPa高度场(单位: gpm)与水平矢量风场: (a) 9月3日00:00; (b) 9月4日00:00
Fig. 1 Geopotential height (gpm) and horizontal wind vector at 700 hPa from NCEP: (a) 0000 UTC 3 Sep 2004; (b) 0000 UTC 4 Sep 2004

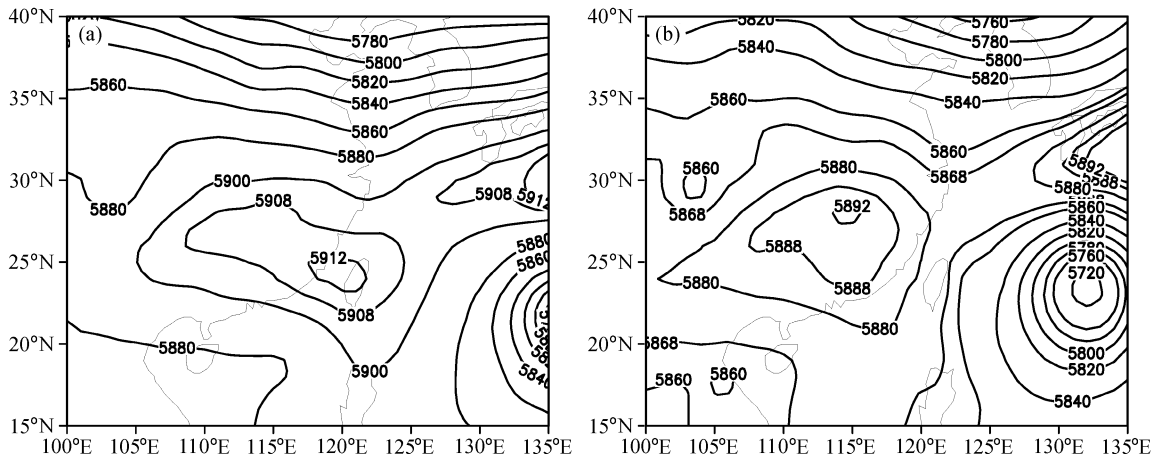


图2 NCEP资料500 hPa高度场(单位: gpm): (a) 9月3日00:00; (b) 9月4日00:00
Fig. 2 Geopotential height (gpm) at 500 hPa from NCEP: (a) 0000 UTC 3 Sep 2004; (b) 0000 UTC 4 Sep 2004

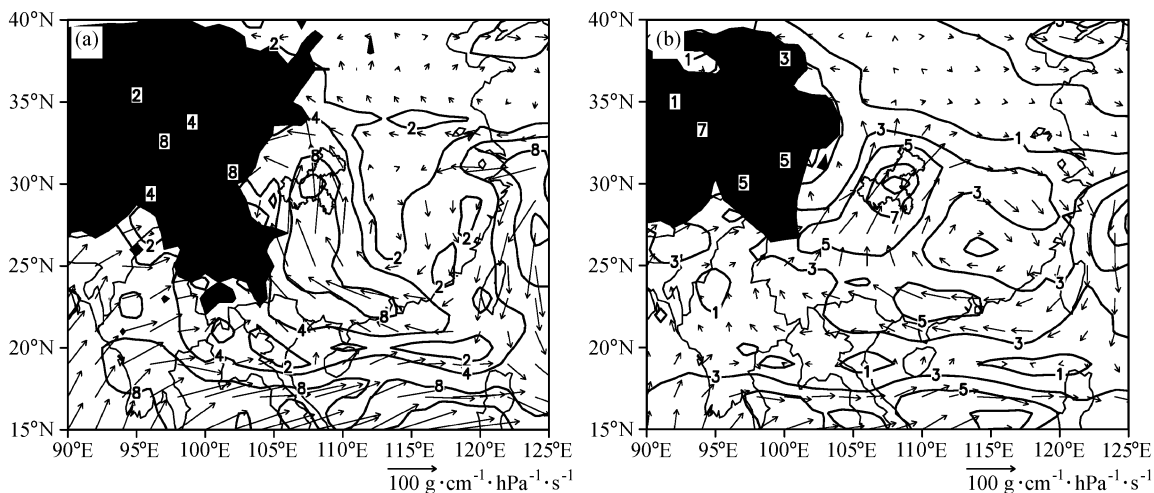


图3 9月1日00:00~6日00:00的平均水平水汽通量和水汽通量矢量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 850 hPa, 阴影为地形高度 >1500 m; (b) 700 hPa, 阴影为地形高度 >3000 m

Fig. 3 The average horizontal moisture flux and moisture flux vector during 0000 UTC 1 Sep 2004 – 0000 UTC 6 Sep 2004 from NCEP (units: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 850 hPa, shaded areas denote the terrain altitude higher than 1500 m; (b) 700 hPa, shaded areas denote the terrain altitude higher than 3000 m

原东部流入四川盆地。对各时刻整层水汽通量(图4)的分析也发现,在暴雨发生前两天至暴雨初期,水汽同样主要来自南海地区。梁萍等^[17]从气候学角度分析指出,川东地区暴雨的水汽主要来源于南海和西太平洋。本文的个例分析也揭示了西南低涡暴雨过程中水汽的这一路径演变特征,这在以往西南低涡暴雨分析研究中强调得很不够,这无疑为未来西南低涡暴雨的预报提供了新的思路和视角。

3 数值模拟

本文利用非静力模式MM5的V3.4版对这次暴雨过程进行了数值模拟。MM5在处理模式大气降水物理过程时有多种方案可选择,这些方案通常分为显式方案和隐式方案^[18]。其中显式方案处理模式可分辨尺度(或称为大尺度)降水物理过程^[19]。隐式方案处理模式不可分辨尺度(或称积云对流)降水过程,常用的积云对流参数化方法有Anthes-Kuo^[20]、Grell^[21]、Arakawa-Schubert^[22]、Fritsch-Chappell^[23]、Kain-Fritsch^[24]等方案。

对于本次模拟,模式使用粗细嵌套网格方案,粗细网格中水平分辨率分别为36 km和12 km,格点数分别为 100×100 、 100×91 ,中心位于(32°N , 112°E)。水汽变化过程选用Reisner方案,网格和次网格尺度降水采用Grell积云对流参数化方案,辐射过程采用CCM2云辐射方案来描述,行星边

界层物理过程采用Eta方案,侧边界条件采用NCEP每6小时一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料。

图5和图6分别为9月4日00:00~5日00:00和5日00:00~6日00:00的实况降水与模拟降水情况。4日00:00~5日00:00实况最大降水量为298 mm,MM5模拟的最大降水量为294 mm,模拟的降水强度和观测较为接近,但模拟的最大降水中心位置较实况偏西约一个经度、偏南约半个纬度。5日00:00~6日00:00两个降水中心基本还是模拟出来了,但模拟的降水中心位置与实况相比还是存在一些偏差。从图5和图6可以看出,模拟的降水能够达到实况降水的量级,虽然中心位置略微有些偏差,但考虑到降水模拟的复杂性和困难程度,本次对降水的模拟基本上认为还是可行的。

另一方面,模式模拟结果基本再现了涡度的结构分布特征。NCEP资料表明在5日12:00涡度的垂直经向剖面图中,除在低层850 hPa附近可以看到很明显的正涡度中心外,在低涡中心的南面400 hPa附近还存在一个正涡度的次大值中心(图7a)。模式将这两个中心都模拟出来了,模拟的低层正涡度中心位置稍微有点偏北(图7b)。对降水及低涡结构的基本再现说明本次模拟能够比较真实地反映此次暴雨过程及相关天气系统的演变,这为后面进一步利用模式输出的高时空分辨率资料分析研究提

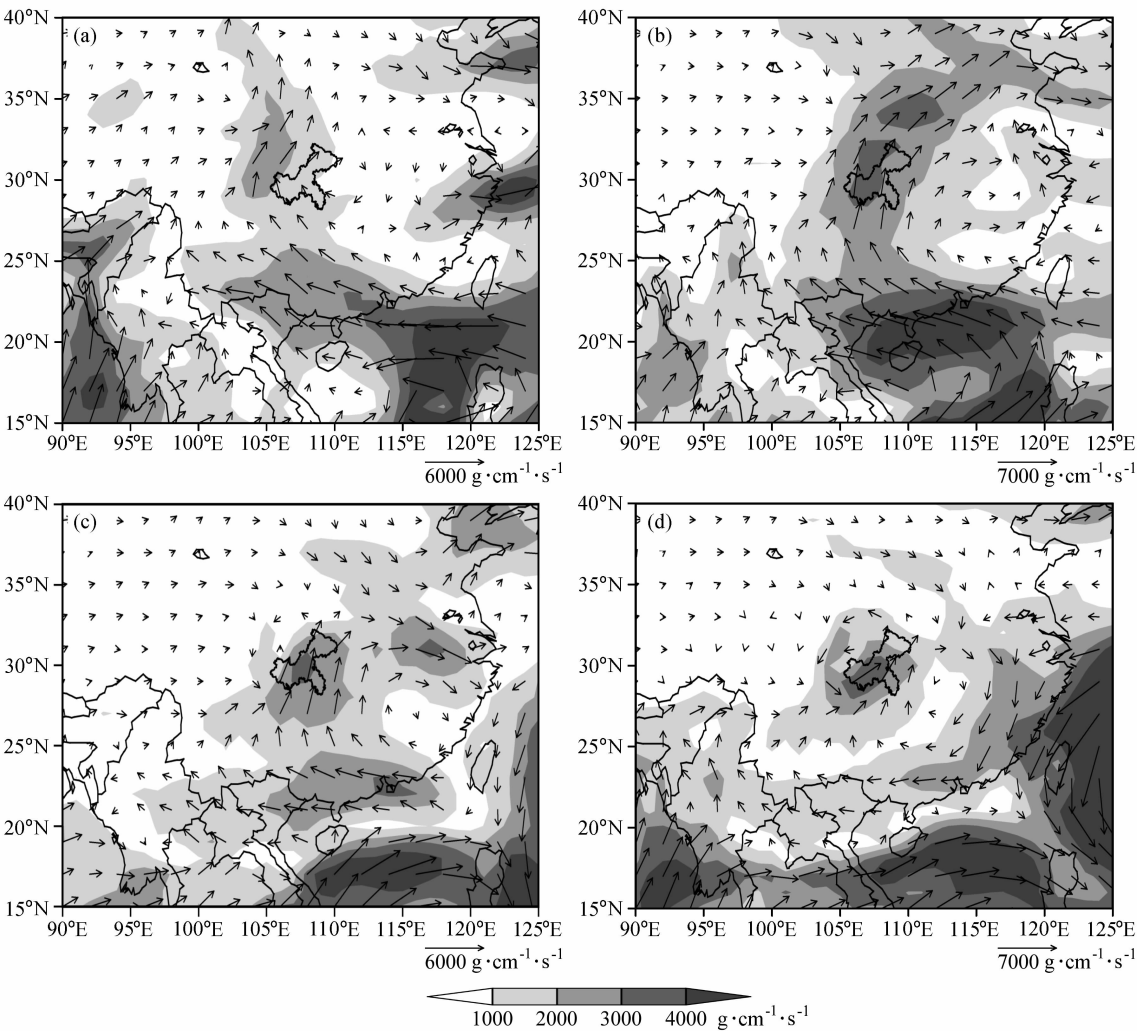


图 4 整层水汽通量和水汽通量矢量：(a) 9 月 1 日 12:00；(b) 9 月 2 日 12:00；(c) 9 月 3 日 12:00；(d) 9 月 4 日 12:00
Fig. 4 The integrated moisture flux and moisture flux vector from NCEP: (a) 1200 UTC 1 Sep 2004; (b) 1200 UTC 2 Sep 2004; (c) 1200 UTC 3 Sep 2004; (d) 1200 UTC 4 Sep 2004

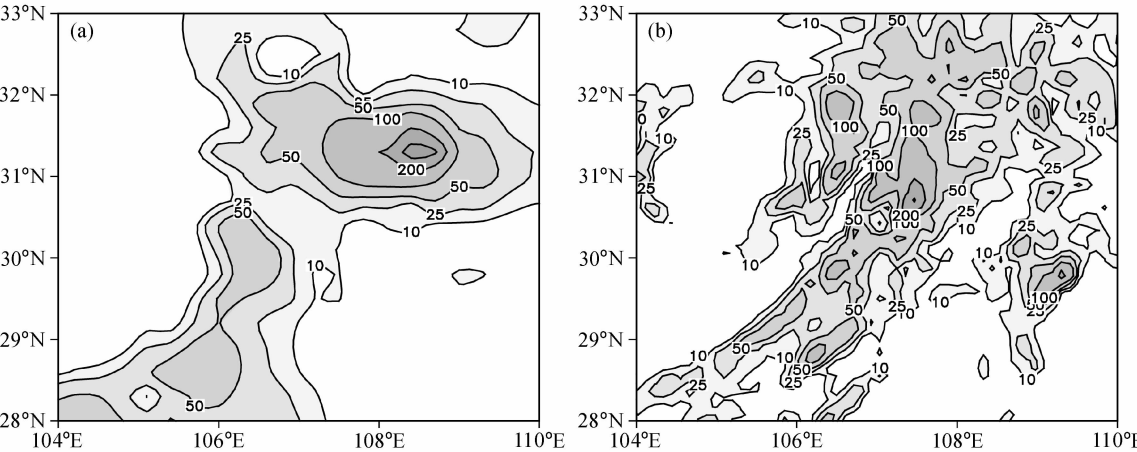


图 5 9 月 4 日 00:00~5 日 00:00 降水 (单位: mm): (a) 实况; (b) 模拟
Fig. 5 (a) The observed and (b) simulated precipitation (mm) during 0000 UTC 4 Sep to 0000 UTC 5 Sep 2004

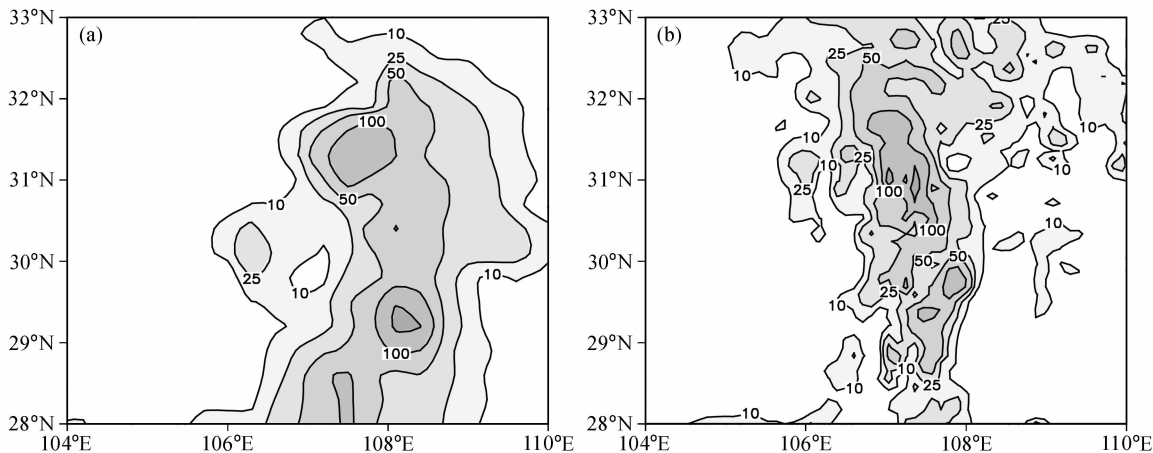
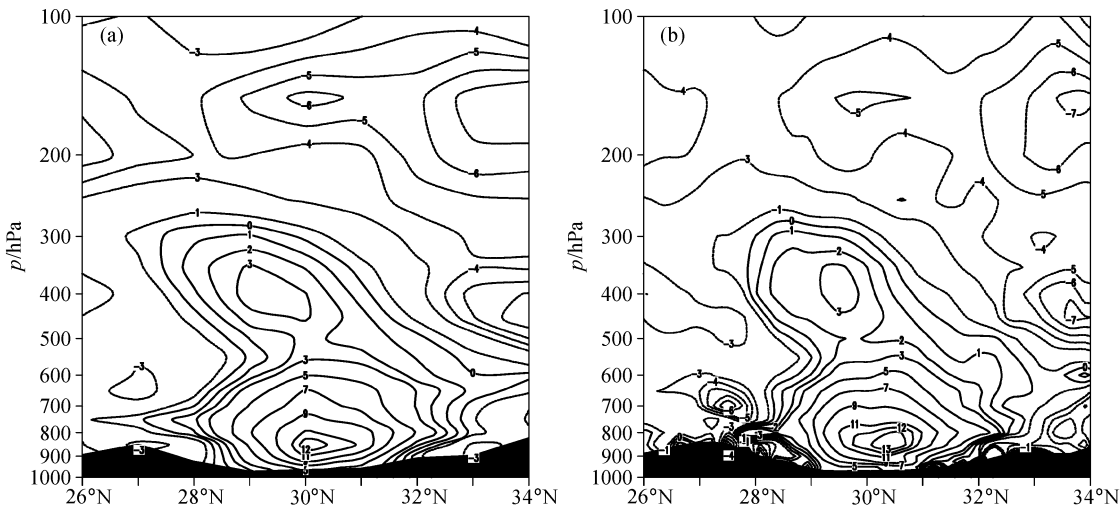


图6 同图5, 但为9月5日00:00~6日00:00

Fig. 6 (a) The observed and (b) simulated precipitation (mm) during 0000 UTC 5 Sep to 0000 UTC 6 Sep 2004

图7 9月5日12:00沿106°E的涡度经向垂直剖面(单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 实况; (b) 模拟。阴影为地形Fig. 7 The cross sections of (a) observed and (b) simulated vorticity (10^{-5}s^{-1}) along 106°E at 1200 UTC 5 Sep 2004. Shaded areas denote terrain

供了比较可靠的保障。

4 低涡结构及演变

西南低涡在9月3日00:00左右初步生成后,经过24 h的发展,西南低涡在9月4日00:00已经达到相当的强度(图1b)。4日00:00~6日00:00是西南低涡的旺盛发展时期,为能更加详细了解这个阶段西南低涡的结构特征及演变,我们利用MM5模式输出的时间间隔为1小时、空间格距为36 km的高分辨率资料对此问题进行了分析研究。

4.1 涡度场水平分布

西南低涡生成后,其强度就不断发展壮大,到

4日06:00在700 hPa涡度场上的西南低涡中心位置处的涡度值就已经超过 $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (图8a)。随后,西南低涡中心位置处的涡度值不断加深发展,到5日00:00左右低涡中心位置处的涡度值达最大,其值超过 $11 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (图8b),在此之后其强度才慢慢减弱(图8c)。相对应在低层西南低涡的发展过程中,中层400~500 hPa也一直伴有涡旋的存在,但中层涡旋的中心位置位于低层低涡的南面,且中层涡旋的发展演变过程与低层明显不同。中层涡旋的发展不像低层涡旋那样单边持续地增长或衰减,400 hPa涡度场第一次极大值出现在4日12:00左右(图9a),然后其强度开始减弱,到5日

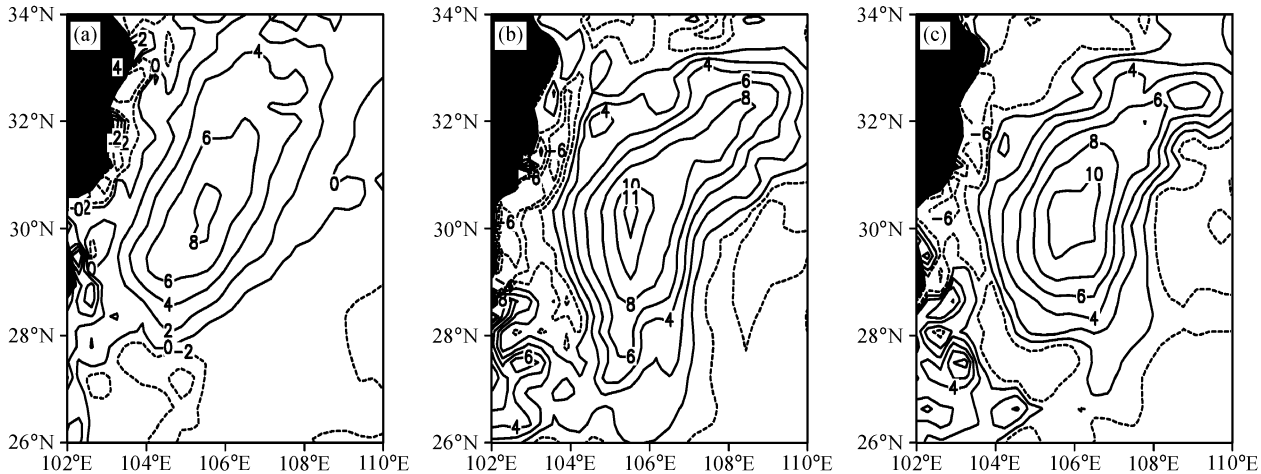


图 8 模拟的 700 hPa 涡度场水平分布 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 9 月 4 日 06:00; (b) 9 月 5 日 00:00; (c) 9 月 5 日 06:00。阴影为地形高度大于 3000 m

Fig. 8 Simulated horizontal vorticity (10^{-5}s^{-1}) at 700 hPa: (a) 0600 UTC 4 Sep 2004; (b) 0000 UTC 5 Sep 2004; (c) 0600 UTC 5 Sep 2004. Shaded areas denote the terrain altitude higher than 3000 m

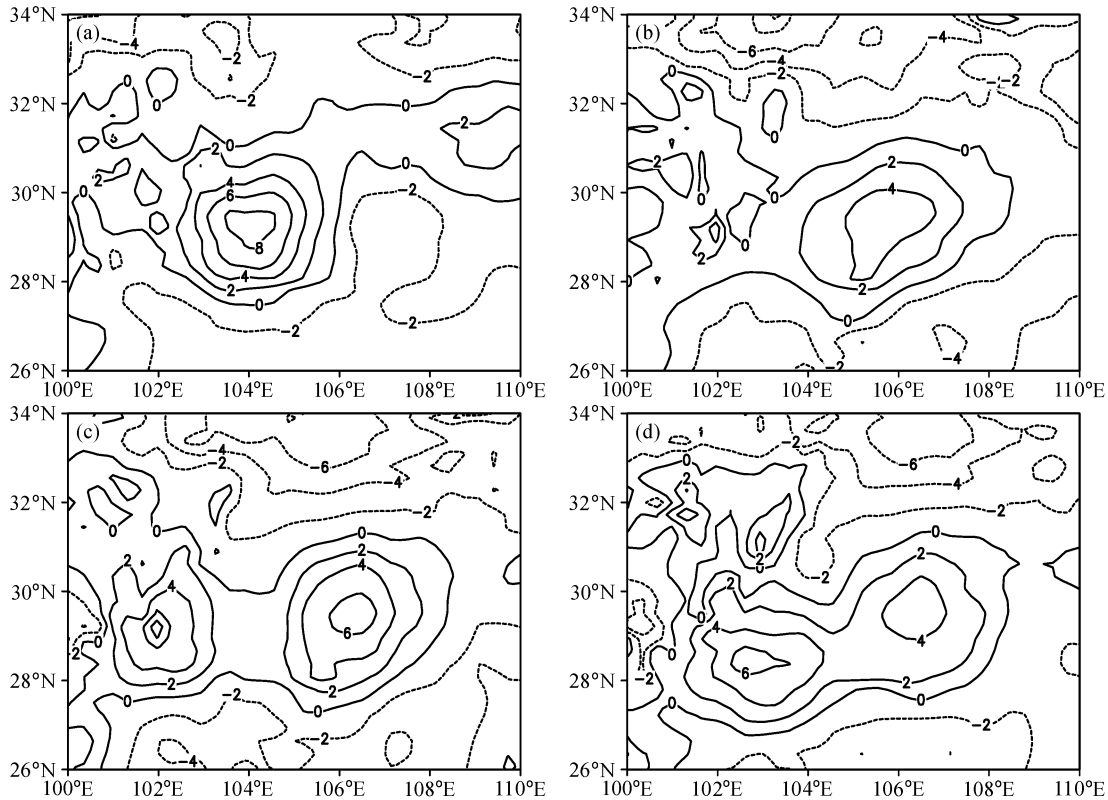


图 9 模拟的 400 hPa 涡度场水平分布 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 9 月 4 日 12:00; (b) 9 月 5 日 03:00; (c) 9 月 5 日 06:00; (d) 9 月 5 日 10:00

Fig. 9 Simulated horizontal vorticity (10^{-5}s^{-1}) at 400 hPa: (a) 1200 UTC 4 Sep 2004; (b) 0300 UTC 5 Sep 2004; (c) 0600 UTC 5 Sep 2004; (d) 1000 UTC 5 Sep 2004

03:00 左右涡旋中心出现极小值 (图 9b)。此时, 在高原东部 (29°N , 102°E) 附近有一新的涡旋开始生成 (图 9b), 此涡旋生成后增长极为迅速, 原来

位于 (29°N , 106°E) 附近的涡旋又重新发展起来并向东移动 (图 9c), 但这个时候低层涡旋已进入衰减阶段 (图 8c)。

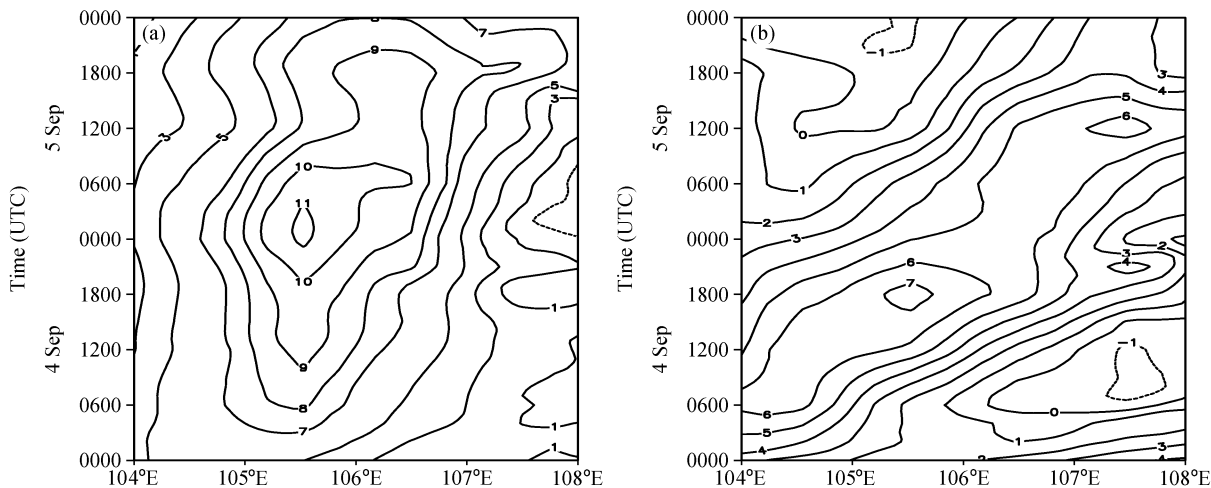


图 10 模拟的 9 月 4 日 00:00~6 日 00:00 涡度沿 30°N 的时间-经度剖面 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 700 hPa; (b) 500 hPa

Fig. 10 Time-longitude cross sections of simulated vorticity (10^{-5}s^{-1}) along 30°N from 0000 UTC 4 Sep 2004 to 0000 UTC 6 Sep 2004: (a) 700 hPa; (b) 500 hPa

4.2 涡度场时变分布

上述涡度场的这种演变特征在涡度场的时变分布图上表现得更为清楚。图 10 给出 700 hPa 和 500 hPa 高度上 4 日 00:00~6 日 00:00 涡度的时间剖面变化, 由图可见, 低层低涡内的正涡度值随时间先增强后减弱, 低层 700 hPa 的最大正涡度值出现在 5 日 00:00 左右。中层 500 hPa 上正涡度分布有明显向东移动的趋势, 并且正涡度值呈现明显的增长-衰减-再增长的演变特征, 但其最大值增长时段和低层低涡的并不一致, 这意味着这个个例中的高空涡旋和低空低涡的相互作用并不是如前面研究者所指出的那样同步耦合发展^[15, 16]。

4.3 涡度场经向剖面

前面的分析已经指出, 低层低涡在生成后其涡度值就不断地增长。但注意到在 4 日 14:00 之前, 垂直方向上向北倾斜的正涡度值分布却是不断向下萎缩的, 并且在垂直方向上逐渐呈现没有倾斜的涡度分布 (图 11a、b)。中层涡旋在发展过程中不断向东移动, 到 4 日 18:00 在 106°E 的经向垂直剖面 500 hPa 附近形成一闭合的涡旋中心, 该中心位于低层低涡中心的南面, 距离低层低涡中心大概一个纬度 (图 11c)。在以后的发展过程中, 中层涡旋和低层低涡的中心在垂直方向上始终没有重合在一起。在低层低涡发展最为强盛的 5 日 00:00 左右, 中层涡旋的强度却是减弱的 (图 11d)。低层低涡减弱时, 在 5 日 06:00 左右, 中层 400 hPa 附近又出

现闭合的涡旋中心 (图 11e)。但在随后的系统演变中, 低层低涡的强度没有再次增强, 而是呈现衰减的特征 (图 11f), 明显不同于前一个高空闭合涡旋出现后引发低层涡旋的增长, 这再一次说明高空涡旋的相互作用并非同步耦合发展。需要指出的是, 从所给的这些图上可看出整个的正涡度值分布在这个时候变为向南倾斜向上延伸。

4.4 涡度场纬向剖面

涡度场的纬向剖面与经向剖面相比, 情况较为特殊, 最主要的原因在于中层涡旋中心和低层涡旋中心并不在一个纬度上。前面的分析已经指出中层涡旋中心位于低层涡旋中心的南面, 这使得涡度场的纬向剖面并不像经向剖面那样能清楚地显示高空涡旋中心的演变。但从涡度场的纬向剖面我们还是可以清楚地看到正涡度带的变化。开始阶段的正涡度带从低层到高层主要表现为东西向都倾斜的结构 (图 12a), 随着高空涡旋的发展, 正涡度带非常明显地向西向上继续延伸 (图 12b)。高空涡旋第二次加强发展后, 其中心位置逐渐向东移动 (图 9c), 相对应的低涡上空的正涡度柱也向东倾斜 (图 12c)。

5 对流的触发与暴雨的产生

模式输出的 1 小时降雨量大于 10 mm 的雨团主要出现在两个时段、两个地方。这里主要讨论第二时段 4 日 22:00~5 日 05:00 出现在西南低涡东

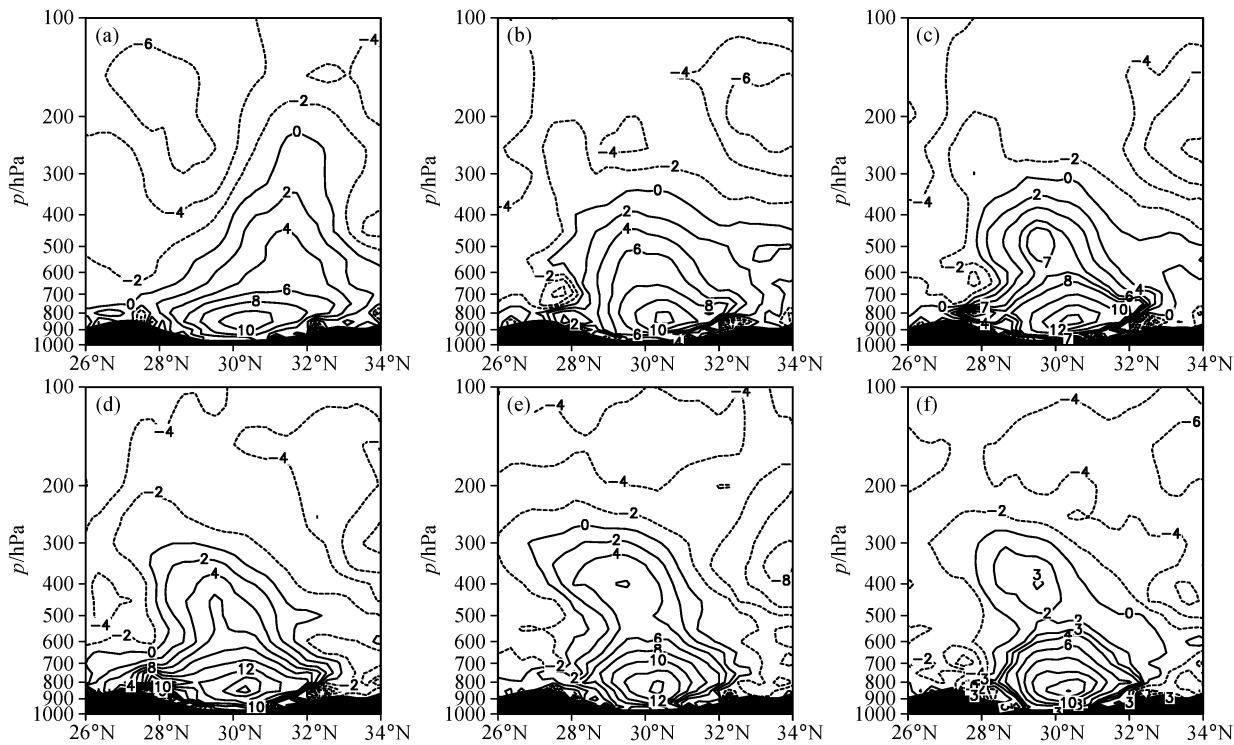


图 11 模拟的涡度沿 106°E 的经向垂直剖面 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 9 月 4 日 02:00; (b) 9 月 4 日 14:00; (c) 9 月 4 日 18:00; (d) 9 月 5 日 00:00; (e) 9 月 5 日 06:00; (f) 9 月 5 日 13:00, 阴影为地形

Fig. 11 Cross sections of simulated vorticity (10^{-5}s^{-1}) along 106°E: (a) 0200 UTC 4 Sep 2004; (b) 1400 UTC 4 Sep 2004; (c) 1800 UTC 4 Sep 2004; (d) 0000 UTC 5 Sep 2004; (e) 0600 UTC 5 Sep 2004; (f) 1300 UTC 5 Sep 2004. Shaded areas denote terrain

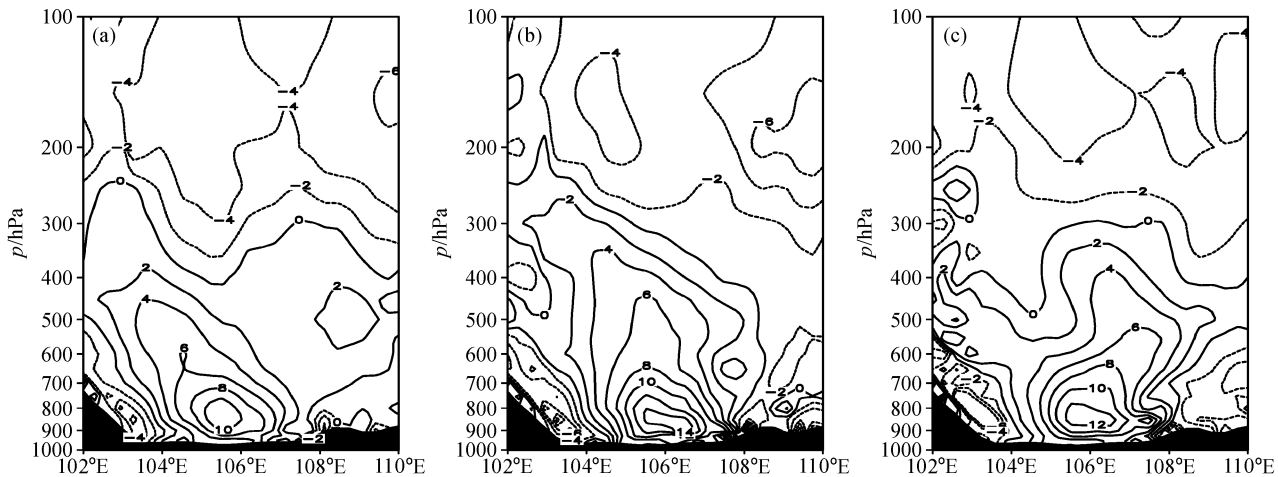


图 12 模拟的涡度沿 30°N 的纬向垂直剖面 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 9 月 4 日 03:00; (b) 9 月 4 日 20:00; (c) 9 月 5 日 10:00, 阴影为地形

Fig. 12 Cross sections of simulated vorticity (10^{-5}s^{-1}) along 30°N: (a) 0300 UTC 4 Sep 2004; (b) 2000 UTC 4 Sep 2004; (c) 1000 UTC 5 Sep 2004. Shaded areas denote terrain

侧的降水情况及其触发机理。

图 13 显示模式输出的 1 小时降雨量雨团在这个阶段主要出现在西南低涡东侧的切变线附近, 而没有出现在西南低涡中心, 西南低涡暴雨的发生具

有非常明显的不均匀性, 这与矫梅燕等^[2]的结论是一致的, 1 小时最大降雨量超过 14 mm (图 13c)。前面的分析已经指出, 5 日 00:00 时附近西南低涡的涡度值增长发展达到最大值 (图 8、10), 西南低

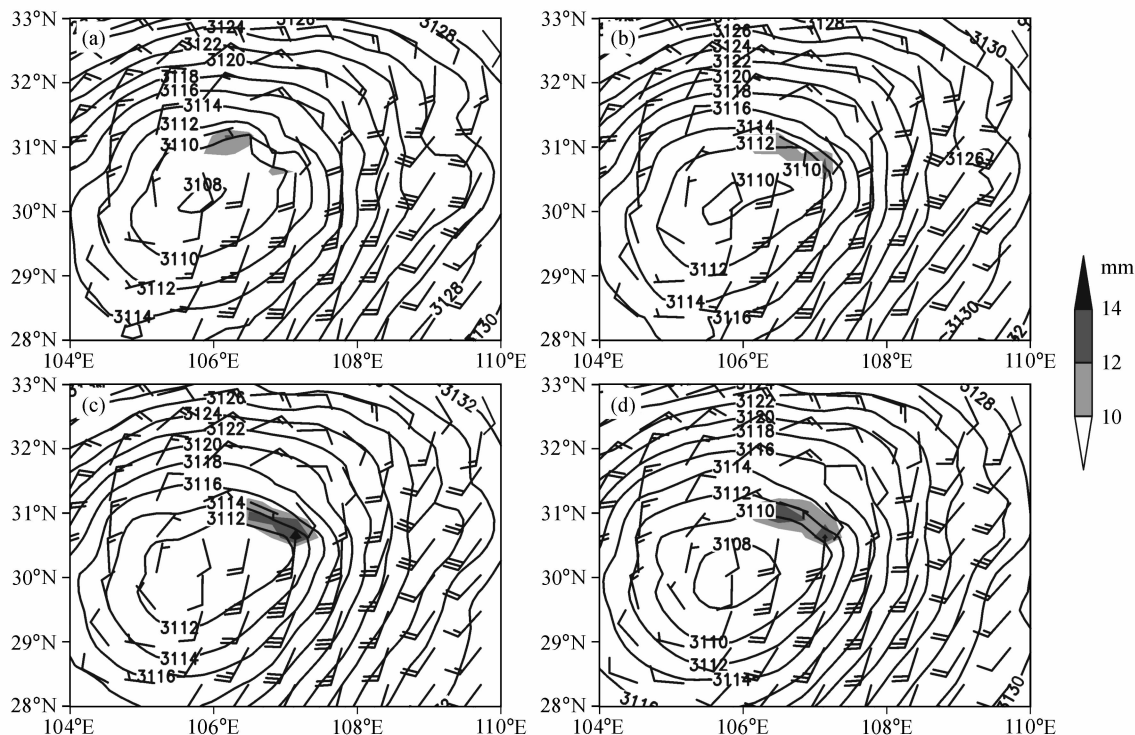


图 13 模拟的 700 hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm)、风场和每小时雨量分布 (阴影): (a) 9 月 4 日 23:00; (b) 9 月 5 日 00:00; (c) 9 月 5 日 01:00; (d) 9 月 5 日 02:00

Fig. 13 Simulated geopotential height (isoline, units: gpm), wind vector at 700 hPa and one-hour rainfall (shaded): (a) 2300 UTC 4 Sep 2004; (b) 0000 UTC 5 Sep 2004; (c) 0100 UTC 5 Sep 2004; (d) 0200 UTC 5 Sep 2004

涡的这种加强发展过程和暴雨的发生过程在时间上是非常一致的。

当然, 对于这次西南低涡暴雨, 一方面在暴雨发生前, 大量的水汽已经源源不断地从南海向四川盆地汇聚 (图 3、4); 另一方面, 在这些潮湿的空气里不稳定能量越聚越多。湿位涡是既含有动力因子又包含水汽因子的物理量, 能有效地显示出暴雨天气的某些特点。MPV1 表示惯性稳定性和对流稳定性的作用, MPV2 包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。对区域平均湿位涡 MPV1 和 MPV2 的分析显示, 低层低涡在暴雨发生前 MPV1 均为负值, 表明低层大气是处于对流不稳定状态的 (图 14a)。MPV2 的分布 (图 14b) 表明暴雨发生后区域内几乎由之前的斜压不稳定转为稳定了。水汽和不稳定能量的累积为这种非均匀降水的发生提供了必要条件, 强对流的最终激发是导致这场暴雨发生的关键因素。陈栋等^[25]对湿位涡的分析, 也认为盆地内垂直不稳定的强烈发展, 使得低涡强烈发展, 导致了暴雨的发生。

由于降水雨团主要出现在低涡东侧的切变线附

近, 因此, 我们沿 106°E 作一南北向剖面来分析研究强对流的发生发展过程。4 日 14:00 时, 在 850 hPa 至 700 hPa 之间, 低层低涡 (31°N 附近) 的切变是非常明显的, 南北相向的风在此交汇, 但此时低涡两侧南北气流的辐合导致的上升运动却非常弱, 说明此时对流还没有发展起来 (图 15a)。4 小时后, 在低涡切变线附近开始出现可画出等值线的垂直上升运动, 但此时上升运动仍然很弱, 最大上升运动的垂直速度仅为 0.2 m/s 左右, 最大上升运动的中心位于 700 hPa 至 600 hPa 之间 (图 15b)。但仅过 3 小时, 南北气流辐合造成的上升运动迅速加强, 最大上升运动的垂直速度超过 0.4 m/s 左右, 且最大上升运动的中心上移到 600 hPa 至 500 hPa 之间 (图 15c)。到 4 日 22:00 时, 最大上升运动的中心已移到 500 hPa 附近, 此时暴雨开始发生 (图 15d)。至此, 高分辨率的模式输出资料分析清晰地显示了在西南低涡东侧切变线里强对流从无到有的发生发展过程, 但从这里也可以看出仅仅有切变线并不能保证时时就有对流的发生。

前人的许多工作^[4~10]已指出, 如果没有中高层

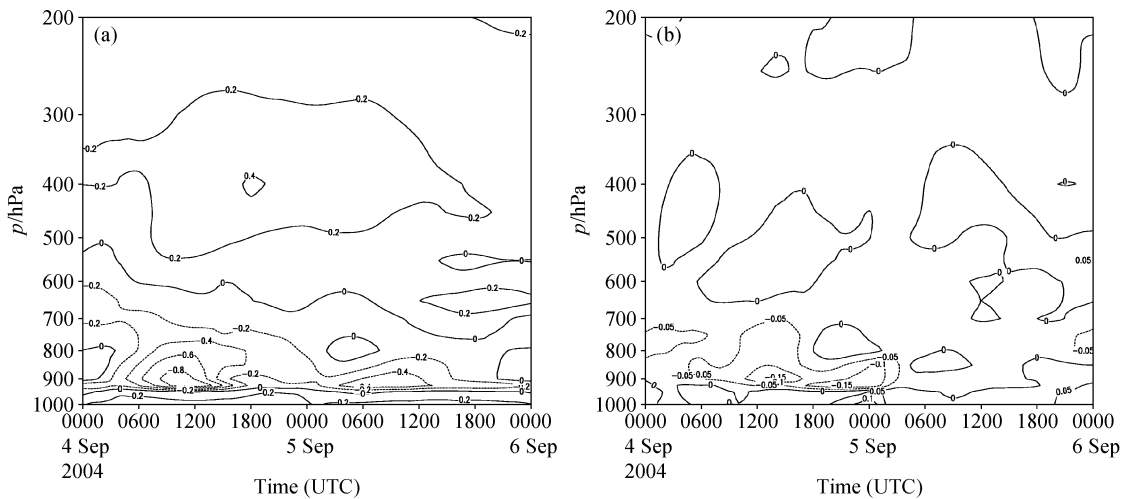


图 14 模拟的区域平均沿 (30°N, 106°E) 的时间剖面[单位: PVU ($1\text{ PVU}=1.0\times10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}$)]: (a) MPV1; (b) MPV2
Fig. 14 Time cross sections of simulated area-averaged moisture potential vorticity (PVU) along (30°N, 106°E): (a) MPV1; (b) MPV2

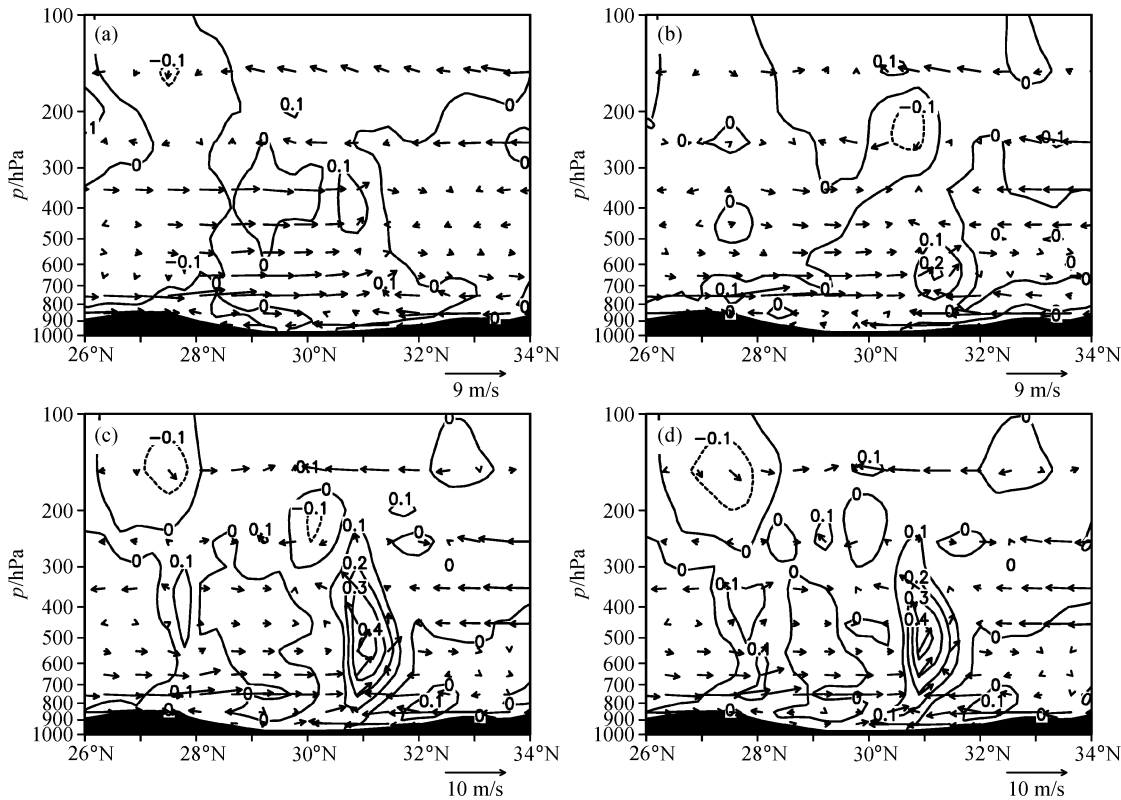


图 15 模拟的 9 月 4 日沿 106°E 剖面的风矢量场 (v 和 $w\times10$) 和垂直速度的等值线 (单位: m/s): (a) 14:00; (b) 18:00; (c) 21:00; (d) 22:00. 阴影为地形
Fig. 15 Cross sections of simulated wind vector (v and $w\times10$) and vertical velocity (m/s) along 106°E: (a) 1400 UTC 4 Sep 2004; (b) 1800 UTC 4 Sep 2004; (c) 2100 UTC 4 Sep 2004; (d) 2200 UTC 4 Sep 2004. Shaded areas denote terrain

天气系统的配合,西南低涡出现后要想进一步发展起来是非常困难的。前面的分析也表明在这次西南低涡的发展过程中,中层大气始终存在一个中尺度

涡旋,且这个中层涡旋的发展和低层低涡的发展并不同步。况且,与低层涡旋的很少移动不同,这个中层涡旋是从西向东移动的(图 10)。图 16 显示这

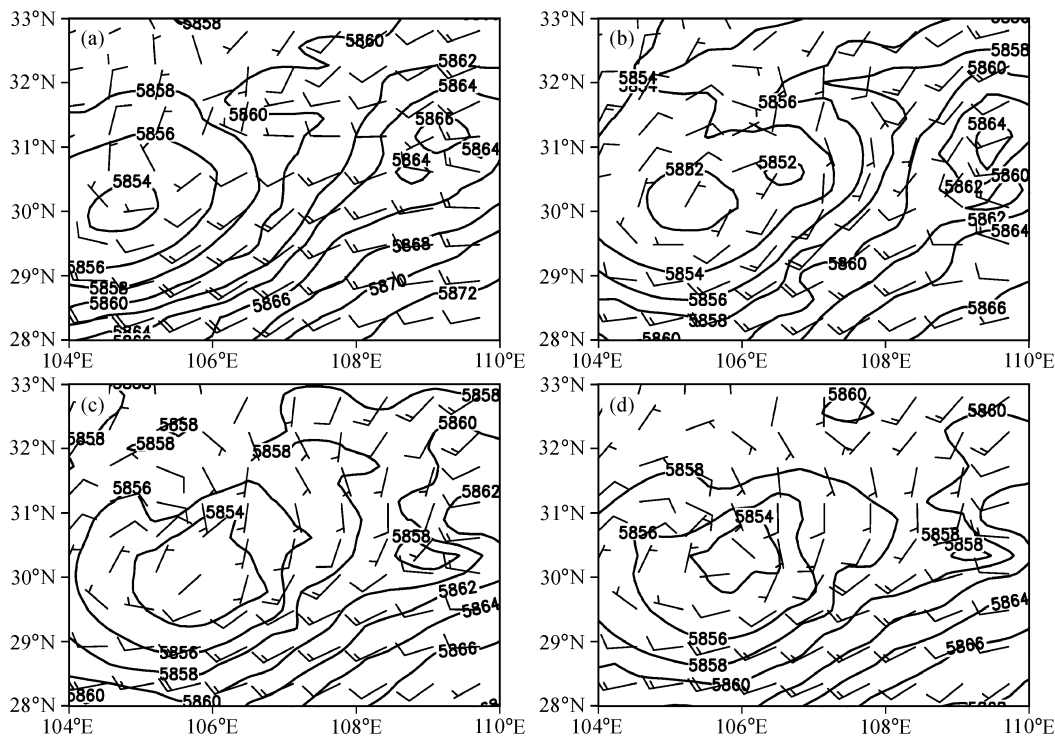


图 16 模拟的 9 月 4 日 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm) 和风向: (a) 14:00; (b) 18:00; (c) 21:00; (d) 22:00

Fig. 16 Simulated geopotential height (isoline, units: gpm) and wind vector at 500 hPa: (a) 1400 UTC 4 Sep 2004; (b) 1800 UTC 4 Sep 2004; (c) 2100 UTC 4 Sep 2004; (d) 2200 UTC 4 Sep 2004

个中层涡旋实际上是中层大气里的一个中尺度闭合低压造成的, 这个闭合低压是由高空槽加深发展而来的。4 日 14:00 时, 这个闭合低压中心 5854 gpm 线位于 (30°N, 105°E) 附近 (图 16a), 此时, 低层低涡东侧切变线里的对流还没有发展起来 (图 15a)。4 小时后, 5854 gpm 线向东北方向扩展到了 (31.5°N, 107°E) 一带 (图 16b), 低涡东侧切变线里的垂直运动开始逐渐加强 (图 15b)。随后几小时, 这个闭合低压移到了低涡东侧的切变线上空 (图 16c、d), 切变线上的对流垂直运动随即发展起来 (图 15c、d), 并随之带来暴雨。实际上, 从图 15 也可以看出, 由于受高空槽前偏南气流的作用, 上升运动的中心也逐渐由 31°N 以北位置移到 31°N 上空。前面这些分析表明, 引发这次暴雨的西南低涡东侧切变线上的对流运动是由高空槽里的闭合低压激发出来的。

6 小结与讨论

通过对 2004 年 9 月 2~6 日四川盆地东部地区大暴雨的分析, 表明高原上的切变线、西南低涡、

高空涡旋以及被切断的副热带高压是影响此次暴雨过程的主要天气系统。利用 NCEP 再分析资料对 850 hPa、700 hPa 候平均水平水汽通量和各时刻整层水汽通量的分析表明, 此次西南低涡暴雨的水汽主要来自南海, 这股水汽沿西太副高的西南侧经青藏高原东部流入四川盆地。

数值模拟研究表明 4 日 00:00~5 日 00:00 是西南低涡不断增强的时期, 此期间低涡内不稳定性最强。在低涡的发展过程中, 中层一直伴有涡旋的存在。但中层涡旋的中心位置位于低层低涡的南部, 其发展演变过程也与低层明显不同。中层涡旋的发展不像低层西南低涡那样单边持续地增长或衰减, 中层涡旋的正涡度值呈现明显的增长-衰减-再增长的演变特征, 其最大值增长时段和低层低涡的并不一致。

在低涡的发展与停滞期间, 在 500 hPa 附近青藏高原上空不断有小槽向东移动并加深发展, 中层涡旋实际就是在这个小槽发展起来的闭合低压造成的。文献[4~10]已指出高空加深发展的低槽前的正涡度平流和上升气流有利于低层减压, 中层涡旋

的这种动力作用对西南低涡的维持和发展起到了积极作用。分析每小时模式输出雨量及垂直运动发现,正是高空槽里的闭合低压激发了西南低涡东侧切变线里的对流上升运动,并最终带来了大暴雨。

参考文献 (References)

- [1] 中国气象局预测减灾司. 2005 年全国重大天气过程总结和预报技术经验交流会论文摘要汇编. 北京, 2005. 1~88
Department of Forecasting Services and Disaster Mitigation of China Meteorological Administration. The Compilation of Abstracts of the Conference on Summing-up and Intercommunication of Severe Weather in 2005. Beijing, 2005. 1~88
- [2] 矫梅燕, 李川, 李延香. 一次川东大暴雨过程的中尺度分析. 应用气象学报, 2005, **16** (3): 699~704
Jiao Meiyun, Li Chuan, Li Yanxiang. Mesoscale analyses of Sichuan heavy rainfall. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (3): 699~704
- [3] 王春国, 肖红茹, 湛贵珣. 四川盆地东北部 2004 年“9.3”大暴雨天气过程浅析. 四川气象, 2005, **1**: 10~13
Wang Chunguo, Xiao Hongru, Chen Guixun. The analysis of 2004 “9.3” heavy rain in north-east of Sichuan Basin. *Sichuan Meteorology* (in Chinese), 2005, **1**: 10~13
- [4] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyun. *Rainstorm in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [5] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986. 275pp
Lu Jinghua. *The Conspectus of Southwest Vortex* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1986. 275pp
- [6] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用. 大气科学, 1987, **11** (3): 263~271
Gao Shouting. The dynamic action of the disposition of the fluid fields and the topography on the formation of the Southwest Vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1987, **11** (3): 263~271
- [7] 赵平, 卢敬华. 一次西南低涡形成机制的数值试验. 低纬高原天气, 1990, **3**: 48~53
Zhao Ping, Lu Jinghua. Numerical simulation of the formation mechanism of Southwest Vortex. *Weather Over Low Latitude Plateau* (in Chinese), 1990, **3**: 48~53
- [8] 钱正安, 顾弘道, 颜宏. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡的数值模拟. 气象学报, 1990, **48** (4): 415~423
Qian Zheng'an, Gu Hongdao, Yan Hong. Numerical simulation of extremely intense rainstorm and Southwest Vortex over Sichuan in July 1981. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1990, **48** (4): 415~423
- [9] 李国平, 万军, 卢敬华. 暖性西南低涡生成的一种可能机制. 应用气象学报, 1991, **2** (1): 91~99
Li Guoping, Wan Jun, Lu Jinghua. A potential mechanism of the warm vortex genesis in Southwest China. *Quarterly*

- Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1991, **2** (1): 91~99
- [10] 孙淑清, 田生春, 杜长萱. 中尺度低涡发展时高层流场特征及能量学研究. 大气科学, 1993, **17** (2): 137~147
Sun Shuqing, Tian Shengchun, Du Changxuan. The features of flow pattern in upper level and energy conversion during the development of meso-scale vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1993, **17** (2): 137~147
- [11] 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜. 典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用. 大气科学, 2006, **30** (4): 578~586
Qin Danyu, Fang Zongyi, Jiang Jixi. The cloud systems of heavy rainfall in the typical Meiyu period and their interactions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (4): 578~586
- [12] Kuo Y H, Cheng L H, Anthes R A. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe 11–15 July 1981. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1984~2003
- [13] 黄福均. 西南低涡的合成分析. 大气科学, 1986, **10** (4): 402~408
Huang Fujun. A composite analysis of the Southwest Vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1986, **10** (4): 402~408
- [14] 陈忠明, 缪强, 闵文彬. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析. 应用气象学报, 1998, **9** (3): 273~282
Chen Zhongming, Miao Qiang, Min Wenbin. A case analysis on mesoscale structure of severe Southwest Vortex. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (3): 273~282
- [15] 程麟生, 郭英华. “81.7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断. 大气科学, 1988, **12** (1): 18~26
Cheng Linsheng, Guo Yinghua. The diagnosis of vorticity source of Southwest Vortex in the initial and mature stages during the Sichuan rainstorm in July 1981. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1988, **12** (1): 18~26
- [16] 陈忠明, 闵文彬, 缪强, 等. 高原涡与西南涡耦合作用的个例分析. 高原气象, 2004, **23** (1): 75~80
Chen Zhongming, Min Wenbin, Miao Qiang, et al. A case study on coupling interaction between plateau and Southwest Vortex. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (1): 75~80
- [17] Liang Ping, LI Wei, Chen Longxun, et al. Features and sources of the anomalous moisture transport for the severe summer rainfall over the upper reaches of the Yangtze River. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19** (4): 202~215
- [18] 张金善, 钟中, 黄瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介. 海洋预报, 2005, **22** (1): 31~40
Zhang Jinshan, Zhong Zhong, Huang Jin. An introduction to mesoscale model MM5. *Marine Forecasts* (in Chinese),

- 2005, **22**(1): 31~40
- [19] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. 大气科学, 1998, **22** (4): 548~561
Zhang Dalin. The role of all kinds of non-adiabatic physical processes in mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 548~561
- [20] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**: 270~286
- [21] Grell G A. Prognostic evolution of assumption used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 764~787
- [22] Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 674~701
- [23] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure system. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 1722~1733
- [24] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 2784~2802
- [25] 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用. 大气科学, 2007, **31** (2): 185~201
Chen Dong, Li Yueqing, Huang Ronghui. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern background of large-scale circulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 185~201